

Proposition de thèse cofinancée par le CNES, période 2019 – 2022

Détermination de sections efficaces à hautes températures et modélisation représentative des atmosphères des exoplanètes chaudes ciblées par ARIEL

Directeur : Yves Bénilan

Co-encadrant : Olivia Venot

Co-financement envisagé : bourse ministérielle ou bourse région (DIM ACAV+)

Profil de doctorant : Titulaire d'un Master 2 en Astrophysique ou Physique moléculaire. Bonne connaissance en physique moléculaire et attiré par l'aspect expérimental

Résumé :

La mise en service des missions spatiales JWST (*James Webb Space Telescope*) et ARIEL (*The Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-Survey*) dans la prochaine décennie doit permettre des avancées majeures dans la connaissance des systèmes planétaires à travers l'étude des exoplanètes. Il y a moins de vingt cinq ans, la découverte des premières exoplanètes a révélé la diversité des mondes planétaires que l'Univers abritait. Depuis, plusieurs milliers d'exoplanètes ont été confirmées avec des masses, des rayons, et des paramètres orbitaux très variés. Les observations par spectroscopie de transit effectuées ces dernières années avec des instruments spatiaux (*Hubble*, *Spitzer*) et au sol ont permis de caractériser la présence de quelques molécules dans l'atmosphère d'exoplanètes et aussi de contraindre la structure thermique de ces dernières. Cependant la qualité et la quantité des observations actuelles font que beaucoup d'inconnues demeurent concernant ces mondes : quels sont les liens entre la nature de l'étoile et les caractéristiques des planètes ? Comment la composition chimique de l'atmosphère et son évolution est liée à l'environnement de formation ? Pour répondre à ces questions, l'étude systématique d'un très grand nombre de systèmes planétaires est indispensable. Cette étude de grande ampleur sera réalisée par la mission ARIEL (PI : G. Tinetti) qui vient d'être sélectionnée par l'ESA comme la mission M4 du programme Cosmic Vision. Nous sommes fortement impliqués dans cette mission puisque Olivia Venot est membre du Consortium Scientifique et responsable du Groupe de Travail « Chimie ». Par ailleurs, nous sommes également très impliqués dans la préparation des observations du JWST.

La composition chimique des exoplanètes sera déterminée en confrontant les observations des futurs télescopes ARIEL et JWST aux résultats de différents modèles : modèle cinétique et modèle d'inversion des données d'observation. L'indice de confiance dans l'interprétation des observations dépend donc essentiellement de la fiabilité et de la robustesse des modèles utilisés. Pour cette thèse, nous proposons de nous concentrer sur l'amélioration des modèles photo-thermochimiques utilisés pour déterminer la composition chimique des exoplanètes. **C'est une étape essentielle pour planifier les observations des atmosphères des exoplanètes par la mission ARIEL et par la suite pour interpréter les observations futures.**

Une source majeure d'incertitude dans les modèles photo-thermochimiques est la inadéquation entre les données physico-chimiques utilisées (principalement les sections efficaces d'absorption connues à température ambiante) et les caractéristiques des atmosphères étudiées (températures très élevées). Pour représenter de façon correcte la composition chimique des exoplanètes chaudes, nous souhaitons déterminer expérimentalement la dépendance thermique des sections efficaces d'absorption dans le domaine VUV, des principales molécules d'intérêt atmosphérique. Ces données n'existent pas actuellement et sont très attendues par la communauté. **L'équipe « Exobiologie et Astrochimie » du LISA est une des seules au monde à avoir l'expertise pour réaliser ces déterminations et a déjà acquis une reconnaissance internationale dans ce domaine.** Ces mesures seront réalisées sur notre nouvelle plateforme spectroscopique en cours de montage au LISA. Celle-ci a été financée par la région Ile de France (DIM-ACAV), par l'OSU (projet FEDER) et par le CNES dans le cadre du projet EXACT (PI : O. VENOT). **Cette thèse s'inscrit dans la mise en service et l'utilisation de cette plateforme spectroscopique pour développer des modèles pertinents pour l'étude des atmosphères d'exoplanètes.**

Proposition détaillée :

La mission spatiale ARIEL a été sélectionnée par l'ESA le 20 mars 2018. Elle aura pour but d'observer un très grand nombre (~1000) d'exoplanètes chaudes afin d'obtenir une vision globale des diverses compositions chimiques et structures d'atmosphères planétaires existantes dans l'univers proche. Cela permettra de mieux comprendre les mécanismes de formation et d'évolution planétaire. En effet, à l'heure actuelle beaucoup de questions demeurent sans réponse, faute de données d'observation suffisamment précises et nombreuses. Avant le lancement d'ARIEL prévu en 2028, plusieurs phases de préparation vont avoir lieu. C'est dans ce contexte que nous avons lancé le projet **EXACT** (*Exoplanetary Atmospheric Chemistry at high Temperature*) qui contribuera à une meilleure compréhension des atmosphères d'exoplanètes. Les modèles développés dans ce projet (modèles cinétiques 1D, 3D et d'inversion de données) seront utilisés pour préparer les observations d'ARIEL en réalisant des prédictions de composition chimique qui permettront d'établir la liste des cibles. Nous les utiliserons également pour analyser les observations du JWST qui nous parviendront dès 2021. Nous pourrons ainsi tester nos modèles avant le lancement d'ARIEL et caractériser l'atmosphère de quelques exoplanètes. Ce projet contient quatre axes de développements distincts qui seront menés en parallèle. Le fil directeur sera celui de **déterminer expérimentalement des données physico-chimiques à températures élevées pour une modélisation représentatives des atmosphères des exoplanètes chaudes.**

Les modèles cinétiques 1D d'exoplanètes décrivent les réactions chimiques se déroulant dans leurs atmosphères. Ils prennent en compte les processus de photodissociations, engendrées par l'irradiation stellaire. Pour calculer les taux de photodissociations, les données indispensables sont les sections efficaces d'absorption dans le domaine VUV (*Vacuum-Ultraviolet*). Ces données sont connues à température ambiante pour les molécules les plus abondantes, mais très peu d'études ont été réalisées sur leur dépendance thermique. Faute de données adaptées, les modèles cinétiques d'exoplanètes chaudes utilisent les données à température ambiante pour simuler des atmosphères avec une température généralement comprise entre 500 et 2000 K. Il en résulte une incertitude sur les abondances chimiques prédites. **Pour palier au manque de données et réduire l'incertitude sur les abondances prédites par les modèles cinétiques, nous avons entrepris depuis plusieurs années de mesurer expérimentalement la dépendance thermique des sections efficaces VUV des principales molécules d'intérêt atmosphérique.** Plusieurs campagnes de mesures, notamment au centre de rayonnement synchrotron BESSY (Berlin) nous ont permis d'étudier le dioxyde de carbone (CO₂) entre 150 et 800 K sur la gamme 115-230 nm (Venot+2013, 2018a). Nous avons observé une augmentation importante de l'absorption avec la température (Figure 1).

De ces mesures, nous avons pu déterminer une paramétrisation de la section efficace d'absorption qui ne dépend que de la température et de la longueur d'onde. Cette paramétrisation est plus facile à intégrer dans les modèles atmosphériques.

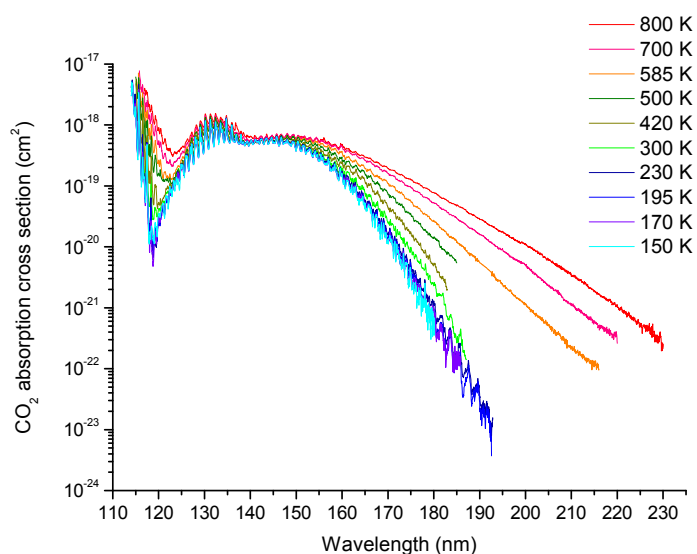


Figure 1: Section efficace d'absorption du dioxyde de carbone à différentes températures entre 150 et 800 K. Tiré de Venot+2018a.

Ces nouvelles données ont un fort impact sur les prédictions des modèles cinétiques (Venot+2013, 2018a). Par exemple, nous avons montré que les abondances de nombreuses espèces sont modifiées de plusieurs ordres de grandeur lorsque l'on utilise la section efficace du CO_2 correspondant à la température de l'atmosphère modélisée au lieu de celle à température ambiante (Figure 2). Ces résultats prouvent à quel point les molécules sont liées les unes aux autres et qu'il est indispensable d'étudier l'absorption à haute température des autres espèces chimiques.

Depuis quelques années, nous avons effectué plusieurs campagnes de mesures au synchrotron SOLEIL (St Aubin) qui nous ont permis de commencer l'étude de C_2H_2 , NH_3 et HCN (proposals n°20141255, 20150691, 20161053, 20170912). Les premières mesures indiquent une dépendance thermique importante de l'absorption. Pour finaliser ces études, d'autres mesures sont nécessaires.

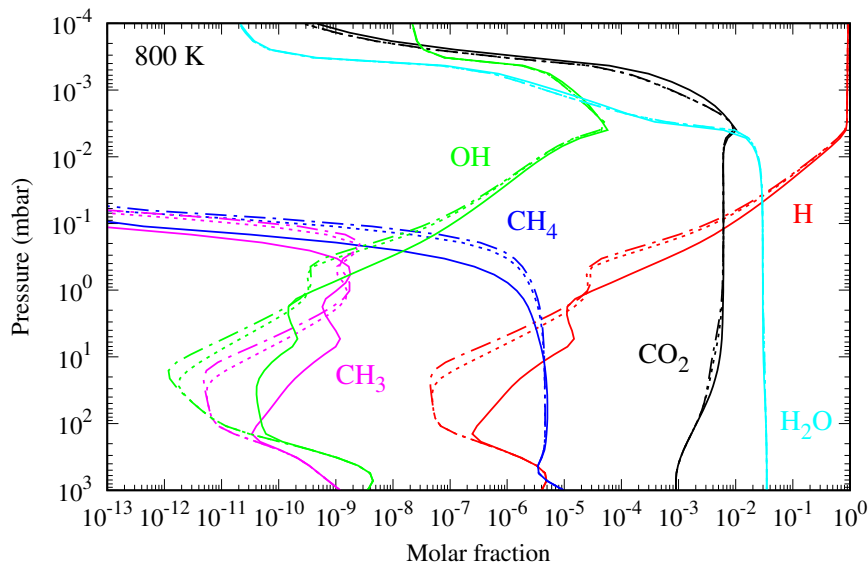


Figure 2: Profils verticaux d'abondances de certaines molécules (CO_2 , H , H_2O , CH_4 , OH et CH_3) déterminés avec le modèle cinétique. Pour le CO_2 , différentes sections efficaces ont été utilisées : à température ambiante (trait plein), à 800 K (pointillé) et une formulation analytique (tiret-point) déterminée à partir des mesures. Tiré de Venot+2018a.

Pour ne plus être tributaire de l'attribution annuelle de temps de faisceau au synchrotron, et ainsi réaliser nos études à une échelle de temps beaucoup plus courte, nous développons au LISA une plateforme de spectroscopie UV afin de mesurer les sections efficaces d'absorption de molécules importantes pour les atmosphères planétaires chaudes. Le financement pour cette plateforme a été obtenu auprès de diverses sources : région Ile de France (DIM-ACAV), OSU FEDER et le CNES (projet EXACT).

Dans le cadre du projet EXACT, l'ensemble du matériel (monochromateur pour l'ultraviolet, fentes optiques pour l'ultraviolet, réseaux optiques, lampe à Deutérium, photomultiplicateur, système de pompage...) sont commandés à la société McPherson et arriveront au premier semestre 2019. L'installation aura lieu ensuite dans un délai d'environ six mois. Nous souhaitons qu'un doctorant accompagne l'installation et la mise en place de la plateforme afin de s'appropriier pleinement le dispositif expérimental.

Le programme que nous envisageons une fois la plateforme installée (premier semestre 2020) est le suivant :

- **Mesures expérimentales. Nous étudierons avec ce dispositif toutes les molécules importantes absorbant le rayonnement stellaire dans les atmosphères d'exoplanètes.** Nous commencerons par NH_3 , HCN , C_2H_2 car ces molécules sont très importantes pour la caractérisation des atmosphères exoplanétaires. Détecter ces espèces sur les spectres planétaires observationnels permettrait de déterminer la teneur en carbone des atmosphères (Venot+2015). Il est donc important de déterminer leur abondance réelle. Pour chaque molécule, nous mesurerons la section efficace d'absorption à des températures comprises entre 300 et 1000 K grâce au dispositif expérimental.

- *Traitement des données.* Etant donné que nous avons déjà effectué de nombreuses mesures sur synchrotron, les programmes nécessaires au traitement de données et au calcul des sections efficaces d'absorption à partir des données brutes ont déjà été développés.

- *Analyses des données et paramétrisation de l'absorption.* Pour chaque espèce, la variation thermique de l'absorption sera étudiée. Il faudra déterminer quelles sont les modifications de population des niveaux expliquant les variations d'absorption (transitions rovibrationnelles plus ou moins intenses). Notre équipe possède une grande expertise dans ce domaine. Par ailleurs, pour intégrer ces données dans les modèles atmosphériques, il est utile de déterminer une paramétrisation de la section efficace dépendant uniquement de la température et la longueur d'onde. Pour cela, nous utiliserons un programme que nous avons déjà développé pour traiter les données de CO₂ (Venot+2018a).

- *Application des données aux atmosphères d'exoplanètes.* Ces nouvelles données expérimentales seront intégrées dans nos modèles cinétiques 1D et 3D, puis utilisés lors de la phase B d'ARIEL pour établir la stratégie d'observation et la liste des exoplanètes cibles. Nous pourrons simuler la composition chimique des atmosphères d'exoplanètes avec des données correctes, correspondant aux températures de ces atmosphères. Ces prédictions fiables sont indispensables pour préparer correctement les futures observations du télescope ARIEL et pour analyser les futures observations du télescope JWST.